

三峡库区 1980 ~ 2005 年农业用地氮平衡时空变化研究

徐昔保, 杨桂山, 李恒鹏

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 利用三峡库区分区县农业统计资料, 对 OECD 土壤表观氮平衡模型进行适当改进, 计算分析三峡库区 1980 ~ 2005 年农业用地氮平衡时空变化格局及驱动机制. 结果表明, 1980 ~ 2005 年库区氮总输入和总盈余量呈显著增长趋势, 分别从 23.4 万 t 和 14.4 万 t 增长到 45.6 万 t 和 30 万 t; 氮总输出量 1980 ~ 1995 年呈增加趋势, 从 9.0 万 t 到 16.7 万 t, 1995 年后基本保持稳定趋势; 单位面积氮盈余量 1980 ~ 1998 年总体呈持续增加趋势, 从 133.4 kg/hm² 增长到 310.3 kg/hm², 1998 年后逐步趋向稳定, 但空间分布区域差异性增强, 主要集中在库中和库首区县, 与库区移民数量空间分布具有一定的相似性; 氮输入贡献主要来源于化肥、牲畜粪便、人粪尿和生物固氮, 累计占总输入 90% 以上; 1995 年前库区氮平衡变化主要受国内大量使用化肥宏观环境影响, 1995 年后受水库淹没和移民影响较大, 但其具体影响程度有待进一步分析; 建议考虑适当发展副业、改变农业种植结构或进行生态移民等措施减少氮排放量.

关键词: 三峡库区; 氮平衡; 农业用地; 时空变化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2227-07

Spatio-Temporal Changes of Nitrogen Balance in 1980-2005 for Agricultural Land in Three Gorges Reservoir Area

XU Xi-bao, YANG Gui-shan, LI Heng-peng

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Based on the long-term agricultural statistics data at the county scale, the estimation of nitrogen balance from 1980 to 2005 for agricultural land in Three Gorges Reservoir Area was made by the OECD soil surface nitrogen balance model with some suitable modification. The spatio-temporal changes of nitrogen balance and its drivers were analyzed. The results showed that the total inputs and total surplus of nitrogen from 1980 to 2005 presented increasing trends continuously, from 23.4×10^4 t and 14.4×10^4 t to 45.6×10^4 t and 30×10^4 t respectively. The total output of nitrogen in 1980-1995 was at the increasing trend, from 9.0×10^4 t to 16.7×10^4 t, while that of 1996-2005 was keeping steady. The average unit surplus of nitrogen in 1980-1998 was also at the increasing trend, from 133.4 kg/hm² to 310.3 kg/hm²; and the trend inclined to be steady after 1998, while the spatial differential pattern toned up. The great spatial changes for nitrogen surplus from 1980 to 2005, mainly centralized at the head and the middle of the Three Gorges Reservoir Area, similar to the spatial distribution of the resettlement. Fertilizer, manure and biological fixation were the main contributors of nitrogen input sources, accumulatively totaled for above 90%. Nitrogen balance changes were mainly influenced by the macro-environment of fertilizer utilization before 1995, while which were influenced by the large amounts of the resettlement for Three Gorges Project after 1995. However, how much the effects of the resettlement on nitrogen balance need to be further explored. Developing sideline, agricultural structure transition or ecological resettlement should be considered to control nitrogen emission.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; nitrogen balance; agricultural land; spatio-temporal change

随着河流、湖泊及海洋河口富营养化趋势的不断加剧, 农业用地氮、磷营养盐平衡估算研究已受到环境科学工作者的广泛关注^[1~3]. 三峡工程是举世瞩目的特大型水利工程, 1992 年动工, 2003 年蓄水到 135 m, 2006 年蓄水到 156 m, 2009 年竣工后将蓄水到 175 m. 截止 2008 年 6 月底, 三峡四期移民已全部完成, 累计搬迁安置 124 万多人, 淹没耕地约 170 km². 虽然移民政策调整后, 外迁安置农村移民 20 余万, 但库区人地关系矛盾依然十分突出, 人均占有耕地不足 0.053 hm². 为了满足库区移民就地后靠安置

需求, 通过改造坡耕地为梯田、改冬水田为水旱两熟田和增加耕地肥料投入提高粮食产量等措施来保证粮食生产安全^[4], 导致库区耕地化肥施用量和耕地复种指数迅速提高, 分别从 1995 年的 411 kg/hm² 和 220% 激增到 2007 年的 1 000 kg/hm² 和 275.86%. 库区化肥使用量和坡耕地面积比例的激增, 直接导致

收稿日期: 2008-10-13; 修订日期: 2009-01-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-08-01)

作者简介: 徐昔保(1978 ~), 男, 博士后, 主要研究方向为土地利用与环境效应和 GIS 空间分析, E-mail: xuxibao@163.com

农业用地氮、磷流失量迅速增加,加上水库蓄水后减缓了库区水体流速,导致库区水体富营养化的风险急剧上升,已成为影响三峡水库水质的重要因素之一.三峡水库 2003 年蓄水到 135 m 后,香溪河等 12 条入库一级支流氮、磷污染严重,已不同程度出现富营养化及“水华”现象^[5];2006 年蓄水到 156 m 后,3 ~ 10 月库区一级支流水体处于富营养状态的断面比例月均值高达 26.0%^[6],水体富营养化状况进一步加剧.因此,如何有效控制和减少三峡库区农业用地氮、磷面源污染排放已成为三峡库区水安全研究的核心问题之一.本研究以区县农业统计数据为主要数据源,对 OECD 土壤表观氮平衡模型进行适当改进计算三峡库区 1980 ~ 2005 年农业用地氮平衡变化,揭示库区农业用地氮盈余量时空变化规律及驱动机制,以期对三峡库区农业面源污染控制和水环境治理提供科学依据.

1 材料与方法

农业用地营养盐平衡研究最初在欧洲的经济发展与合作组织(organization for economic cooperation and development, OECD)的国家进行^[1,7,8],将模型计算结果作为 OECD 成员国农业环境评估的重要指标之一.此后,研究范围逐渐扩大到其它国家^[9~11],也有研究者对全球大区域尺度农业系统营养盐平衡进行了计算^[12].20 世纪 90 年代,鲁如坤等^[13,14]根据中国科学院分布于六大典型地区生态站中进行的养分循环研究数据,对我国典型地区农田养分支出和收入参数、养分平衡评价方法和原则等进行了系统分析,为我国农业用地营养盐循环和平衡研究奠定了基础.近年来,国内学者在大尺度上估算了长江、黄河和珠江三大流域和全国氮盈余量变化^[15~19],也有学者利用 OECD 土壤表观氮平衡模型计算了县级尺度、流域尺度氮盈余长期变化^[20,21]和某一时段全国土壤表观氮平衡^[22].因数据限制和空间尺度等多种因素影响,计算时考虑因子不尽全面.本研究在综合相关报道的基础上,根据三峡库区农业用地的特殊性 & 数据收集的有效性,对 OECD 土壤表观氮平衡模型进行适当改进,建立下列区域农业用地氮平衡模型:

$$\begin{aligned} N_{\text{balance}} = & N_{\text{fert}} + N_{\text{manure}} + N_{\text{straw}} + N_{\text{fix}} \\ & + N_{\text{seed}} + N_{\text{dep}} - N_{\text{harvest}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, N_{balance} 为区域农业用地氮平衡量; N_{fert} 、 N_{manure} 、 N_{straw} 、 N_{fix} 、 N_{seed} 和 N_{dep} 分别为化肥、人畜粪便、秸秆、生物固氮、种子带入和大气沉降等的氮输入量; N_{harvest}

为农作物吸收的氮输出量.

本研究以全国农业经济数据库和补充收集的区域统计年鉴为基础资料,对各种途径的氮输入量和输出量进行统计计算,最终汇总出研究区各区县的氮总输入量、总输出量和盈余量.为了统计口径一致,本研究计算时粮食作物包括水稻、小麦、玉米、大都和薯类等 5 类,经济作物包括糖料、油料、麻类、棉花、烟叶和茶叶等 6 类,其它农作物包括蔬菜和水果;牲畜粪便排放没有考虑家禽粪便的氮输入量;秸秆氮输入计算时主要考虑了水稻、小麦、玉米、大豆、薯类、糖料和油料作物.重庆市从 1980 ~ 2005 年经历了多次行政区划调整,因此对所有年份数据都按最新行政区划范围进行了调整,1980 和 1990 年重庆市大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区和渝北区的单位面积氮盈余量用相应年份重庆市区统计口径计算值替代.各种来源氮输入和输出参数综合参考国内外已有的研究成果和文献确定^[13~23],分别见表 1 和表 2.由于氮肥在施用过程中,存在着 NH_3 的挥发,计算时直接将挥发的氮量按 24.56% 比例扣除^[24];人畜粪便从产生、施用到进入土壤大约有 30% 的 NH_3 被挥发掉^[20,21],计算时直接按其比例扣除.

2 结果与分析

2.1 氮输入、输出和盈余量长期变化

从图 1 可以看出,三峡库区氮总输入和总盈余量 1980 ~ 1998 年呈持续增长趋势,分别从 23.4 万 t 和 14.4 万 t 增加到 1998 年的 45.6 万 t 和 30 万 t,比 1980 年分别增长 1.9 倍和 2.1 倍;1998 ~ 2000 年和 2001 ~ 2003 年呈阶段性回落;2003 ~ 2005 年继续持续增长趋势,到 2005 年分别增长到 47.2 万 t 和 31.4 万 t.氮总输出量 1980 ~ 1995 年总体呈增长趋势,从 1980 年的 9 万 t 增加到 1995 年的 16.7 万 t;1996 ~ 2000 年基本保持稳定,2001 ~ 2005 年呈微增趋势,从 14 万 t 增长到 15.8 万 t.相应地,库区农业用地单位面积盈余量 1980 ~ 1998 年总体呈持续增加趋势,从 1980 年的 133.4 kg/hm² 增长到 1998 年的 310.3 kg/hm²,增长约 2.3 倍;1998 ~ 2000 年和 2002 ~ 2004 年呈阶段性回落趋向于稳定趋势,2002 年单位面积盈余量最大,达 355.2 kg/hm².1980 ~ 1998 年库区氮总输入、总盈余量和单位面积盈余量持续增长趋势与国内其他地区^[14]和全国平均变化趋势^[21]基本一致,主要受国内从 20 世纪 80 年代开始持续大量使用化肥的宏观环境影响,库区耕地施肥量从 1980 年

表 1 各类氮源输入指标及利用系数

Table 1 Specific index and coefficients for different nitrogen input sources				
类型		输入指标	系数	返田率/%
化肥/kg	氮肥	施用量(折纯)	1.0	
	复合肥	施用量(折纯)	0.325	
人畜粪便排放/kg•(头•a) ⁻¹	牛	年末存栏量	78.6	
	其他大牲畜	年末存栏量	78.6	
	猪	年末出栏量	4.9	
	羊	年末存栏量	2.3	
	人	农业人口	5.4	
种子带入/kg•hm ⁻²	水稻	种植面积	2.25	
	小麦	种植面积	3.15	
	玉米	种植面积	0.75	
	花生	种植面积	9.45	
	油菜	种植面积	0.045	
生物固氮/kg•(hm ² •a) ⁻¹	豆科植物固氮	种植面积	195	
	土壤生物固氮	农业用地面积	25	
大气沉降/kg•(hm ² •a) ⁻¹	湿沉降	农业用地面积	10.3	
秸秆输入/kg•hm ⁻²	水稻	秸秆/产量比例(1.0)	7.5	30
	小麦	秸秆/产量比例(1.2)	5.2	45
	玉米	秸秆/产量比例(1.5)	5.8	20
	大豆	秸秆/产量比例(1.6)	13	0
	薯类	秸秆/产量比例(0.5)	30	0
	糖料	秸秆/产量比例(2.0)	6.7	90
	油料	秸秆/产量比例(2.5)	6.7	0

表 2 主要农作物氮单位摄取系数

Table 2 Coefficients of specific nitrogen uptake by principal crops			
类型	输入指标		系数
粮食作物/kg•t ⁻¹	水稻	总产量	20
	玉米	总产量	22
	小麦	总产量	25
	大豆	总产量	70
	薯类	总产量	2.5
经济作物/kg•t ⁻¹	糖料	总产量	1.6
	油料	总产量	60
	麻类	总产量	13
	棉花	总产量	13
	烟叶	总产量	13
	茶叶	总产量	160
其它作物/kg•t ⁻¹	水果	总产量	3
	蔬菜	总常量	3.5

133.4 kg/hm²持续增加到 1998 年的 559 kg/hm²;库区 1998 ~ 2003 年呈阶段性回落,2003 年后又开始呈增长趋势,与 1998 年后全国平均变化呈持续回落趋势相左.

2.2 不同氮源输入贡献率长期变化

从图 2 可以看出,三峡库区氮输入贡献主要来源于化肥、牲畜粪便、人粪尿和生物固氮,累计占总输入 90% 以上;种子、大气沉降和秸秆输入累计占总输入 10% 不足.其中化肥输入贡献比例 1980 ~ 1998 年和 2000 ~ 2002 年呈增长趋势,1998 ~ 2000 年和 2002 ~ 2005 年呈下降趋势,最小值和最大值分别为 40.1% 和 63.5%;牲畜粪便输入比例 1980 ~ 2002 年总体呈下降趋势,2002 ~ 2005 年呈迅速上升趋势,

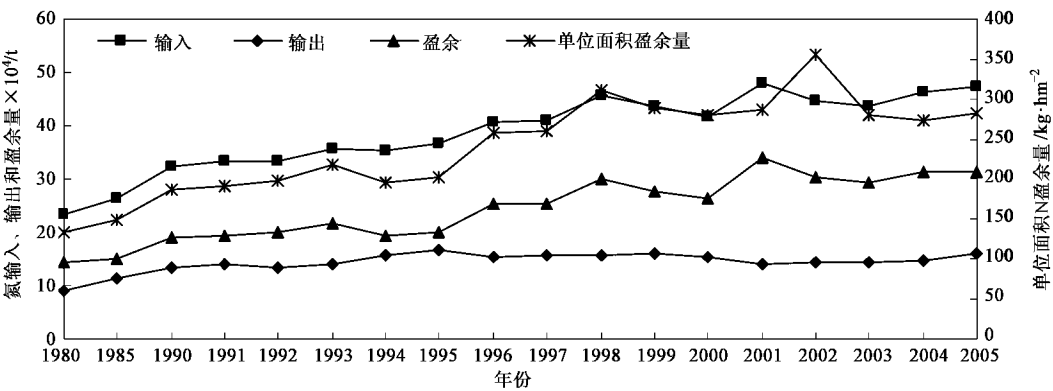


图 1 三峡库区 1980 ~ 2005 年农业用地氮平衡变化

Fig.1 Nitrogen balance changes in 1980-2005 for agricultural land in Three Gorges Reservoir Area

最小值和最大值分别为 12.5% 和 22.4%;人粪尿输入比例 1980~2005 年总体呈持续下降趋势,最小值和最大值分别为 10.6% 和 21.3%;生物固氮输入比例 1980~1995 年总体呈下降趋势,从 1980 年的 11.6% 到 1995 的 6.7%,1996 年后呈稳定趋势;秸秆输入比例总体呈持续下降趋势,从 1980 年的 4.1%

到 2005 年 2.9%;大气沉降输入比例 1980~1998 年呈持续下降趋势,1998 年后呈微增趋势,变化范围为 2.2%~4.8%;种子带入氮的比例一直低于 1%,1996 年略有上升后又呈下降趋势,但变化幅度很小.

2.3 氮盈余空间分布变化

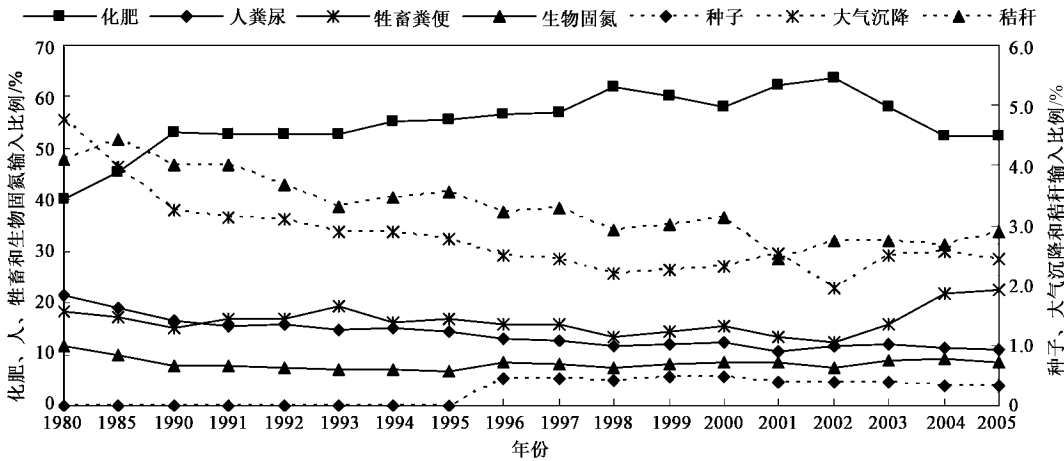


图 2 三峡库区 1980~2005 年农业用地各类氮输入比例

Fig.2 Nitrogen input percents in 1980-2005 for agricultural land in Three Gorges Reservoir Area

图 3 为三峡库区 1980、1985、1990、1995、2000 和 2005 年 6 个代表年份分区县单位面积氮盈余量变化,可以看出三峡库中巫山、巫溪、云阳、开县、石柱和丰都县、库尾的长寿、江北和巴南区的单位面积氮盈余量保持持续增长趋势,2000~2005 年呈快速增长趋势;库首四区县、库中和库尾其他区县在 2000

年后都呈下降趋势.全库区单位面积氮盈余量最高和最低分别为 2000 年大渡口区 和 1985 年巫溪县,分别为 935.2 和 97.3 kg/hm².大渡口区 1995 年后单位面积氮盈余量急速增大,主要受大力发展蔬菜种植影响,为重庆市主要蔬菜和副食品生产基地之一,2005 年农业人口平均蔬菜产量达 1.1 × 10⁴ t.

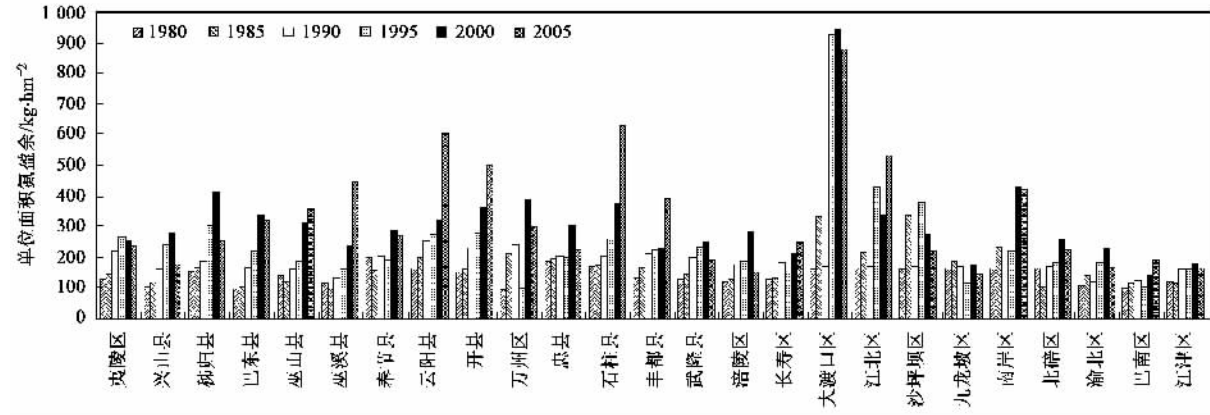


图 3 三峡库区 1980~2005 年分区县农业用地氮盈余变化

Fig.3 Nitrogen balance changes at the county-level in 1980-2005 for agricultural land in Three Gorges Reservoir Area

图 4 为三峡库区分区县单位面积氮盈余量等级空间分布变化图,按 100 kg/hm² 等间距从低到高划分为 8 级.从图 4 中可以看出库区 1980~2005 年单位面积氮盈余量空间变化分异显著,主要集中在库

中和库首区县.1980~1985 年,库区单位面积氮盈余量都较低,变化幅度较小,万州和巴南区单位面积氮盈余量分别从 1 级增加到 3 级和 2 级,巫溪县从 2 级降为 1 级,其他区县都保持 2 级不变.1985~1990

年,库中区县单位面积氮盈余量等级明显比库首和库尾区县高,库中奉节、云阳、开县、万州、忠县、石柱、丰都和武隆,及库首夷陵区单位面积氮盈余量从 2 级增加到 3 级,其他区县为 2 级.1990~1995 年,库首区县单位面积氮盈余量变化较大,兴山、巴东和秭归县分别从 2 级增加到 3、3 和 4 级;库中和库尾区县变化都不大,万州区和忠县分别从 3 级降为 1 级和 2 级,大渡口区 and 江北区比 1985 年显著增加,分别从 4 级和 3 级增加到 8 级和 6 级,其他区县保持不变.1995~2000 年,全库区变化都较大,库首秭归和巴东县分别从 4 级和 3 级增加到 5 级和 4 级;库

中巫山、云阳、开县、万州和石柱县增加到 4 级,奉节、巫溪和忠县从 2 级增加到 3 级;库尾涪陵、长寿、渝北和北碚区增加到 3 级,南岸区从 3 级增加到 5 级,沙坪坝和江北区分别降 1 级;其他区县保持不变.2000~2005 年,库区单位面积氮盈余量空间分布变化分异显著增强,库首秭归和兴山县分别从 5 级和 3 级降为 3 级和 2 级;库中丰都、巫溪和开县分别从 2、3 和 4 级增加到 4、5 和 5 级,云阳和石柱县从 5 级增加到 7 级,万州和武隆分别降 1 级;库尾江北区从 4 级升为 6 级,渝北区从 3 级降为 2 级;其他区县保持不变.

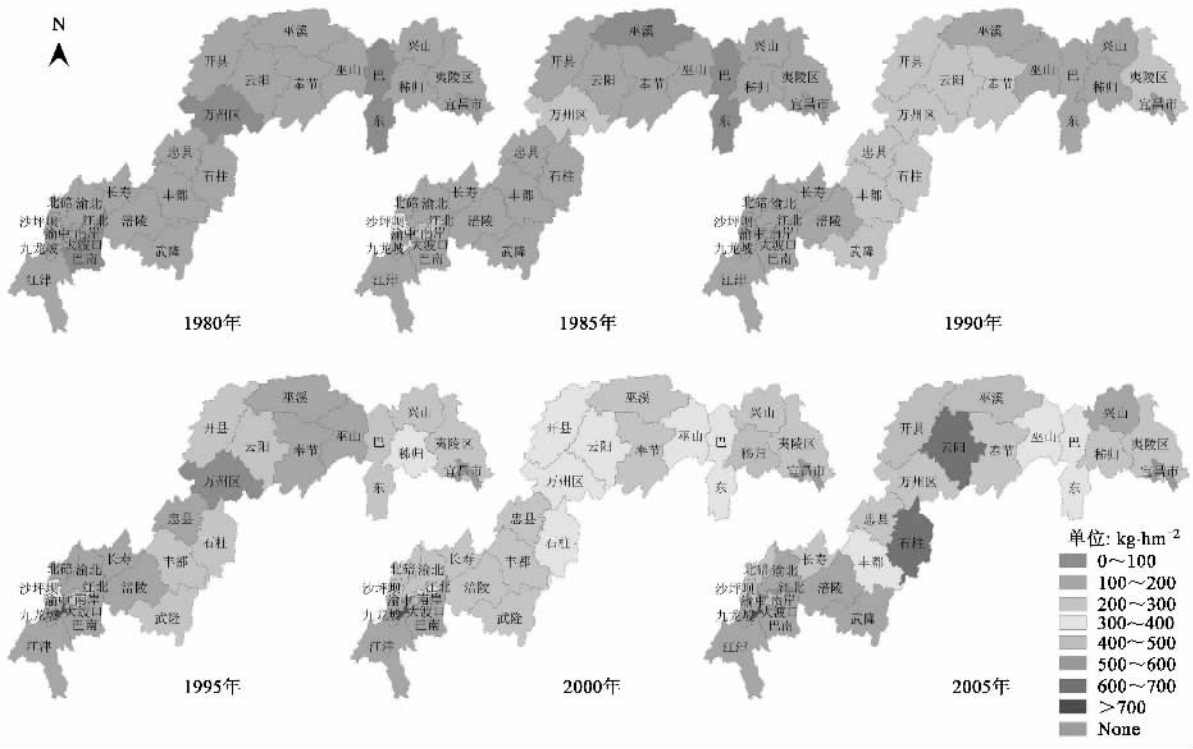


图 4 三峡库区 1980~2005 年农业用地氮平衡时空变化

Fig.4 Spatio-temporal changes of nitrogen balance in 1980-2005 for agricultural land in Three Gorges Reservoir Area

3 讨论

本研究计算氮平衡计算时考虑了农业人口的粪尿排放氮输入,对化肥及人畜粪便排放的 NH_3 挥发根据 1996~2005 年三峡工程生态与环境监测的多年平均值,分别按 24.56% 和 30% 比例在计算输入量时直接扣除.大气沉降计算时只考虑湿沉降,采用在秭归县张家冲小流域实测值 $[10.3 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]^{[23]}$,该值对重庆市和万州区等工业发达、大气污染较严重区域明显偏小;牲畜粪便排放氮输入计算时只考虑主要牲畜,没有考虑家禽粪便的氮输入量;此外,所有年份氮输入和输出参数采取同

一值计算等这些方面对计算结果会产生一定的误差,但据相关研究的经验表明^[20-21],其计算误差占总输入的比例很低,在可控范围之内.

基于上述分析,基本上可以推断 2005 年后库区氮总输入量和总盈余量将继续持续上升趋势,有望在 2009 年 175 m 水位正常蓄水运行后逐渐趋于稳定,库区氮总输出量和单位面积盈余量将在现状基础上逐渐趋于稳定.三峡库区农业用地氮平衡时空变化主要受以下 2 个方面因素影响:①化肥施用量.我国在 1980~1990 年代开始大量使用化肥,据有关部门统计,1990 年代中后期以后,我国耕地年均化肥施用量达 $400 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 以上,单位耕地面积化肥施

用量为美国的 4 倍,而利用率仅 35% 左右;三峡库区化肥施用量持续上升,从 1980 年的 165 kg/hm^2 上升到 1995 年 411 kg/hm^2 ,1995 年后呈加速增长趋势,到 2005 年达到 548 kg/hm^2 ,2007 年增长到 1000 kg/hm^2 ,化肥施用为库区农业用地氮盈余的最大贡献输入;②水库淹没和移民.三峡水库 2006 年二期蓄水 156 m 后,淹没耕地约 170 km^2 ;1993~2005 年期间完成了三期移民,共 111.32 万,其中农业人口 36.57 万,就地后靠安置 18.06 万,重庆市和湖北省非移民区县外安置 6.12 万,省外安置 12.39 万^[25];据 2000~2005 年水土流失遥感调查表明,移民对库区坡耕地的开发导致了库区水土流失加剧,进而必然导致库区农业面源污染排放量的增加,增强了库区水体富营养化的潜在风险,但具体影响程度及与移民数量空间分布的相关性有待后续工作进一步探讨.此外,农业用地氮平衡变化还与不同时期的土地利用方式、农业种植结构等因素也存在一定关系.针对目前库区农业用地高施肥量、高盈余量和高复耕指数现状,后期可以考虑通过适当发展副业、改变农业种植结构或进行生态移民等措施,将有助于有效控制和降低库区农业用地营养盐面源污染排放.

4 结论

(1)三峡库区氮总输入和总盈余量 1980~2005 年总体呈持续增长趋势;氮总输出量 1980~1995 年总体呈增长趋势,1995 年后总体保持稳定趋势;单位面积氮盈余量 1980~1998 年总体呈持续增加趋势,1998 年后逐步趋向稳定趋势,但其空间分布区域差异性增强.

(2)三峡库区氮输入主要来源于化肥、牲畜粪便、人粪尿和生物固氮,累计都占总输入 90% 以上,化肥施用为库区农业用地氮盈余的最大贡献输入,且总体呈上升趋势,因此有待考虑适当发展副业、改变农业种植结构或进行生态移民等措施进行有效控制.

(3)1980~2005 年单位面积氮盈余空间分布变化显著,主要集中在库中和库首区县,1995 后单位面积氮盈余量空间分布变化与库区移民数量的空间分布具有一定的相似性.

(4)三峡库区 1980~1995 年农业用地氮平衡变化主要受国内大量施用化肥宏观环境影响;1995~2005 年除受化肥施用影响外,还受水库淹没和移民影响,但其具体影响程度有待后续工作进一步深入分析.

致谢:本研究农业统计数据由中国自然资源数据库中心李泽辉老师共享提供,特此致谢.

参考文献:

- [1] OECD. OECD national soil surface nutrient balances: 1985 to 1996, Explanatory notes [M]. Paris: OECD Secretary, 1997.
- [2] Somloydy L, Brunner P H, Kroi B H. Nutrient balances for Danube countries: a strategic analysis [J]. Wat Sci Tech, 1999, **40** (10):9-16.
- [3] 杨桂山,王德建.太湖流域经济发展-水环境-水灾害[M].北京:科学出版社,2003.119-131.
- [4] 长江水利委员会.三峡工程生态环境影响研究[M].武汉:湖北科学技术出版社,1997.181-199.
- [5] 张晟,李崇明,郑丙辉,等.三峡库区次级河流营养状态及其营养盐输出影响[J].环境科学,2007, **28**(3):500-505.
- [6] 中华人民共和国环境保护部.长江三峡工程生态与环境监测公报[R].2007.31-34.
- [7] OECD. Environmental indicators for agriculture -- Volume 3: Methods and results [R]. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, 2001.
- [8] OECD. OECD national soil surface nitrogen balances: Explanatory notes [R]. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, 2001.
- [9] Behrendt H, Dannowski R. Nutrients and heavy metals in the Odra river systems [M]. Berlin: WeiBensee Verlag, 2005.
- [10] Tittonell P, Vanlauwe B, Leffelaar P A, *et al.* Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya II. Within-farm variability in resource allocation, nutrient flows and soil fertility status [J]. Agric Ecosyst Environ, 2005, **110** (324): 166-184.
- [11] Salo T, Turtola E. Nitrogen balance as an indicator of nitrogen leaching in Finland [J]. Agric Ecosyst Environ, 2006, **113**(124): 98-107.
- [12] Bouwman A F, Dreht G, Hoek K W. Global and regional surface nitrogen balances in intensive agricultural production systems for the period 1970-2030 [J]. Pedosphere, 2005, **15** (2): 137-155.
- [13] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等.我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 I.农田养分支出参数[J].土壤通报,1996, **27**(4):145-151.
- [14] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等.我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 II.农田养分收入参数[J].土壤通报,1996, **27**(4):151-154.
- [15] Xing G X, Zhu Z L. Regional nitrogen budgets for China and its major watersheds [J]. Biogeochemistry, 2002, **57/58**: 405-427.
- [16] Shen R P, Sun B, Zhao Q G. Spatial and temporal variability of N, P and K balances for agroecosystems in China [J]. Pedosphere, 2005, **15**(3): 347-355.
- [17] Xiang B, Watanabe M, Wang Q X, *et al.* Nitrogen budgets of agricultural fields of the Changjiang River basin from 1980 to 1990 [J]. Sci Total Environ, 2006, **363**: 136-148.
- [18] Sun B, Shen R P, Bouwman A F. Surface N balances in agricultural crop production systems in China for the period 1980-2015 [J].

- Pedosphere, 2008, **18**(3): 304-315.
- [19] Liu C, Watanabe M, Wang Q X. Changes in nitrogen budgets and nitrogen use efficiency in the agroecosystems of the Changjiang River basin between 1980 and 2000 [J]. Nutr Cyc Agroecosyst, 2008, **80**: 19-37.
- [20] 许朋柱, 秦伯强, 香宝, 等. 区域农业用地营养盐剩余量的长期变化研究[J]. 地理科学, 2006, **26**(6): 668-673.
- [21] 许朋柱, 秦伯强, Behrendt H, 等. 太湖上游流域农业土地的氮剩余及其对湖泊富营养化的影响[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(4): 395-400.
- [22] 陈敏鹏, 陈吉宁. 中国区域土壤表观氮磷平衡清单及政策建议[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1305-1310.
- [23] 肖宏宇. 三峡库区几种不同土地利用类型对氮平衡的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007. 25-27.
- [24] 中华人民共和国环境保护部. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 2005. 25-32.
- [25] 国务院三峡工程建设委员会. 中国三峡建设年鉴[M]. 北京: 中国三峡出版社, 2006. 235-239.